

PERKEMBANGAN TENAGA NUKLIR DI DUNIA

Gatot Suhariyono

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Percobaan senjata nuklir buatan manusia telah menambah radioaktivitas yang telah ada secara alami dalam skala dunia. Walaupun percobaan senjata nuklir dikurangi secara besar-besaran sejak tahun 1962, ketakutan akan perang nuklir tetap ada. Pembangunan tenaga nuklir untuk maksud damai berjalan terus dan harus dipercepat, karena persediaan bahan bakar fosil (seperti bensin, minyak tanah dan lain-lain) sudah menipis. Hal ini berarti dengan bertambahnya tenaga nuklir, kekurangan energi listrik dapat diatasi. Akan tetapi volume limbah radioaktif harus diantisipasi, dipantau dan dikendalikan, seperti yang harus dilakukan terhadap bahan berbahaya dan beracun (B3) [1].

Letusan gunung St. Helens lebih berbahaya dibandingkan dengan bencana nuklir di *Three Mile Island* (TMI) pada tahun 1979, karena gunung tersebut mengeluarkan jauh lebih banyak zat dan sinar radioaktif ke atmosfer [2]. Jika dioperasikan secara layak, reaktor nuklir tidak memberikan resiko kesehatan yang berarti. Kecelakaan nuklir terhitung sebagai kecelakaan berdampak besar, namun berpeluang kecil untuk terjadinya kecelakaan. Hal ini terjadi dalam bencana Chernobyl pada tahun 1986, yakni melelehnya inti sebuah reaktor nuklir yang menyebabkan lolosnya radioaktif. Tetapi di Amerika Serikat dan beberapa negara tidak ada reaktor yang desainnya serupa dengan reaktor Chernobyl. Resiko dan pengelolaan limbah tenaga nuklir (titik awal dan akhir daur bahan bakar) juga merupakan persoalan yang umum

diperdebatkan. Akan tetapi hal ini sudah banyak diantisipasi dengan salah satu metode pengelolaan limbah puluhan bahkan ratusan km di bawah tanah yang dikungkung beton di sekelilingnya atau juga disebut penyimpanan limbah lestari.

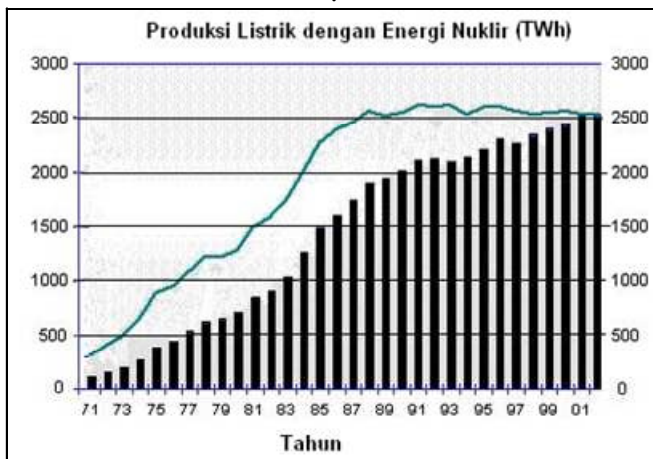
Pada makalah ini akan dikemukakan tentang perkembangan tenaga nuklir di dunia, sekaligus pokok-pokok permasalahannya serta pengelolaan limbah nuklir ke lingkungan, dan pemecahan untuk menganalisa permasalahan yang ada. Hal ini perlu diketahui sebagai bahan pertimbangan untuk dapat mengantisipasi hal-hal yang tidak diharapkan mungkin terjadi, mengingat pemerintah Indonesia berencana akan membangun pembangkit listrik tenaga nuklir di masa yang akan datang.

TANGGAPAN TERHADAP PENDAPAT KELOMPOK ANTI NUKLIR DI DUNIA

Pasang Surut Reaktor Nuklir dan Reaktor Riset di Dunia

Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di dunia sejak tahun 1971 sampai 2002 mengalami kemajuan yang pesat. Kecuali, diantara tahun 1992-1993, jumlah terpasang kapasitas PLTN menurun sedikit saja (Gambar 1) [3,4]. Hal ini diakibatkan beberapa reaktor nuklir tidak beroperasi, dan perlu didekomisioning. Semakin banyak ditemukan problem teknis pada reaktor nuklir yang sudah tua di dunia, maka semakin banyak reaktor nuklir yang bakal ditutup. Oleh karena itu perlu dipertimbangkan

secara matang penanganannya untuk melakukan dekontaminasi, dekomisioning, dan mengganti bagian-bagian yang rusak atau sudah tua demi keamanan dan keselamatan bersama. Perkembangan reaktor nuklir dan reaktor riset di dunia yang masih beroperasi pada tahun 1987, 1989, 2002 dan 2006 ditampilkan pada Tabel 1 [5, 6, 7, 8]. Negara-negara yang belum atau tidak punya reaktor nuklir, tetapi mempunyai reaktor riset ditampilkan pada Tabel 2 [5, 8].



Gambar 1. Kapasitas pembangkit listrik tenaga nuklir di dunia 1971-2002 [3, 4]

Finlandia yang mulanya diperkirakan akan menjadi pelopor dalam pengembangan listrik tenaga nuklir, ternyata mengalami kesulitan, karena parlemen negara itu menolak rencana pemerintahnya untuk memulai proyek nuklir yang ke lima [9]. Akan tetapi sampai Maret 2006, Finlandia punya 4 reaktor nuklir dan 1 reaktor riset, sedangkan 1 reaktor masih dalam konstruksi. Hal ini berarti tidak bisa dipungkiri bahwa pemerintah Finlandia memandang energi nuklir penting untuk kebutuhan listriknya, walaupun parlemen masih meragukannya..

Program nuklir Perancis mengalami krisis serupa. Standar yang ditetapkan oleh pemerintah Perancis masih memungkinkan resiko kerusakan generik yang dapat melebar. Semakin banyak permasalahan teknis telah menyebabkan biaya - biaya perawatan dan perbaikan sampai miliaran franc Perancis. Disamping itu, masalah

regenerasi sumber daya manusia juga merupakan masalah tersendiri pula [9]. Walaupun demikian reaktor nuklir di Perancis pada kenyataannya masih banyak, sampai pada Maret 2006 berjumlah 59 reaktor nuklir dan 26 reaktor riset. Hal ini menunjukkan bahwa pemerintah Perancis masih mengakui perlunya energi nuklir, dan sekaligus sudah dapat mengatasi masalah-masalah teknis yang dihadapi tersebut.

Presiden Bill Clinton di USA merupakan presiden pertama selama setengah abad yang tidak mendukung didirikannya reaktor nuklir baru. Hanya dua reaktor yang sedang diselesaikan pada saat Clinton berkuasa. Itupun setelah 20 tahun, sejak dipesan sebuah reaktor yang baru, dan yang tidak mengalami pembatalan. Sementara itu, sebanyak enam reaktor tua dengan total kapasitas 3.695 megawatt telah ditutup untuk selamanya [10]. Akan tetapi sampai Maret 2006, listrik di USA sebagian besar masih bergantung pada reaktor nuklir, terbukti USA mempunyai reaktor nuklir dan reaktor riset terbanyak di dunia yaitu masing-masing lebih dari 100 reaktor.

Perusahaan listrik milik negara Kanada di kota Ontario Hydro merencanakan untuk menyelesaikan 10 reaktor nuklir lagi pada tahun 2014. Akan tetapi hasil referendum di tingkat propinsi dalam September 1990 dan kenyataan bahwa aset Ontario Hydro ternyata jauh di bawah biaya pembangkit reaktor itu sendiri, akhirnya membatalkan perluasan program tersebut. Perusahaan tersebut bahkan sedang mempertimbangkan untuk mempercepat program pensiun sebagian para karyawannya, karena beberapa reaktor sedang dalam keadaan perlu perbaikan dengan biaya besar [11]. Akan tetapi hal ini tidak sepenuhnya benar, kenyataannya reaktor nuklir di Kanada menjadi 18 reaktor pada Maret 2006 dan masih mempunyai 13 reaktor riset.

Tabel 1. Perkembangan reaktor nuklir dan reaktor riset di dunia yang beroperasi [5, 6, 7, 8]

No.	Nama Negara	1987		1989	2002		Maret 2006		
		R. Nuklir	R. Riset	R. Nuklir	R. Nuklir	Dalam konstruksi	R. Riset	R. Nuklir	Dalam konstruksi
1	Afrika Selatan	2	1	2	2		1	2	
2	Argentina	2	5	2	2	1	7	2	1
3	Armenia	0	0	0	1		0	1	
4	Belanda	2	2	2	1		3	1	
5	Belgia	7	6	7	7		6	7	
6	Brazil	1	3	1	2		4	2	
7	Bulgaria	5	1	6	6		1	4	
8	Cina	0	7	0	3	8	16	9	5
9	Finlandia	4	1	4	4		1	4	1
10	Hongaria	4	3	4	4		2	4	
11	India	6	5	7	14		5	15	8
12	Inggris	38	15	39	33		9	33	
13	Iran	0	1	0	0	2	5	0	1
14	Jepang	36	18	39	54	3	21	55	1
15	Jerman	21	22	24	19		24	17	
16	Kanada	18	14	18	14		13	18	
17	Lithuania	0	0	0	2		0	1	
18	Meksiko	0	3	1	2		3	2	
19	Pakistan	1	1	1	2		2	2	1
20	Perancis	53	21	55	59		26	59	
21	Republik Chezh	8	3	8	5	1	3	6	
22	Korea Selatan	7	3	9	16	4	4	20	
23	Rumania	0	2	0	1	1	3	1	1
24	Rusia	56	24	55	30	2	85	31	4
25	Slovakia	0	0	0	6	2	0	6	
26	Slovenia	0	0	0	1		1	1	
27	Spanyol	9	1	10	9		1	9	
28	Swedia	12	2	12	11		2	10	
29	Swiss	5	4	5	5		5	5	
30	Taiwan	6	6	6	6	2	4	6	2
31	Ukraina	0	0	0	13	4	3	15	
32	USA	106	99	110	104		158	103	1
33	Yugoslavia	1	3	1	0		2	0	
Total		410	276	428	438	30	420	451	26

Program nuklir di negara-negara Blok Timur sesudah kecelakaan Chernobyl juga mengalami pasang surut. Ambruknya demokrasi, dan musibah radiasi kebocoran reaktor Chernobyl (April 1986) yang menyebabkan timbulnya kanker thyroid pada anak-anak, telah membangkitkan protes di kalangan masyarakat

luas dengan pusat kritik pada gagalannya reaktor itu menerapkan standar barat dalam bidang keamanannya. Kecelakaan Chernobyl merupakan satu-satunya reaktor yang inti grafitnya meleleh total dalam sebuah stasiun tenaga nuklir. Kecelakaan tersebut menyebabkan 31 orang meninggal dan 300 orang dirawat di rumah sakit,

Tabel 2. Perkembangan reaktor riset yang beroperasi di negara-negara yang tidak punya reaktor nuklir [5,8]

No.	Negara	Jumlah Reaktor	
		1987	Maret 2006
1	Algeria	0	2
2	Australia	2	2
3	Austria	3	3
4	Bangladesh	1	1
5	Chile	1	2
6	Colombia	1	1
7	Denmark	2	2
8	Ghana	0	1
9	Korea utara	0	1
10	Indonesia	3	3
11	Irak	2	2
12	Israil	2	1
13	Itali	6	9
14	Jamaika	1	1
15	Kongo	0	2
16	Kazakhstan	0	3
17	Libya	1	1
18	Malaysia	1	1
19	Mesir	1	2
20	Norwegia	2	2
21	Nigeria	0	1
22	Philipina	1	1
23	Polandia	3	3
24	Peru	1	2
25	Portugal	1	1
26	Slovenia	0	1
27	Syria	0	1
28	Thailand	1	1
29	Turki	2	3
30	Uzbekistan	0	1
31	Venezuela	1	1
32	Vietnam	1	1
33	Yunani	2	3
34	Zaire	0	1
	Total	29	63

melepaskan unsur radioaktif ke seluruh kawasan bekas Uni Soviet, Eropa Timur, Skandinavia, dan Eropa Barat. Sementara itu, banyak rencana pembangunan reaktor nuklir telah dibatalkan di Republik Chezh, Hongaria, Polandia, dan Rusia.

[2]. Akan tetapi ternyata sampai Maret 2006, hanya Polandia yang belum mempunyai reaktor nuklir, tetapi mempunyai 3 reaktor riset. Sedangkan di Hongaria masih ada 4 reaktor nuklir dan 2 reaktor riset, di Chezh masih ada 6 reaktor nuklir dan 3 reaktor riset. Walaupun di Rusia pernah terjadi kecelakaan Chernobyl, Rusia masih mempunyai 31 reaktor nuklir yang beroperasi, 4 reaktor dalam konstruksi dan reaktor risetnya bertambah banyak menjadi 85 dari 24 reaktor pada tahun 1987.

Di kawasan Asia Timur, kelompok anti nuklir menekankan keberatan-keberatan terhadap reaktor nuklir, semakin sering dilancarkan dan meminta kepada pemerintahnya, agar mencari alternatif energi lain. Jepang sendiri masih memiliki suatu program yang aktif di bidang reaktor nuklir, sekalipun protes-protes tajam terus mengalir, Jepang masih mengimpor plutonium dari Perancis [2, 12, 13]. Karena Jepang mempunyai sumber alam yang terbatas, maka alternatif energi nuklir masih dominan dibutuhkan di Jepang. Sampai Maret 2006, Jepang mempunyai 55 reaktor nuklir, 1 masih dalam konstruksi dan 21 reaktor riset. Korea Selatan sudah membangun 20 reaktor nuklir, dan 4 reaktor riset. Taiwan di lain pihak, memulai proyek reaktor nuklirnya tahun 1987 yang telah ditundanya lebih dari 10 tahun [2, 12, 13]. Taiwan pada Maret 2006 mempunyai 6 reaktor nuklir, 2 reaktor sedang dikonstruksi dan 4 reaktor riset. Cina di luar dugaan yang pada tahun 1987 hanya punya 7 reaktor riset, tetapi sampai Maret 2006 Cina mempunyai 9 reaktor nuklir, 5 sedang dalam konstruksi dan 16 reaktor riset. Hal ini membuktikan bahwa negara-negara Asia Timur hasrat untuk memperluas pembangunan reaktor nuklir dan reaktor riset telah bertambah dibandingkan dengan satu dasawarsa lalu.

Kecelakaan di *Three Mile Island* (TMI) dekat Harisburg, Pennsylvania (Maret 1979), melibatkan hilangnya zat pendingin ke salah satu dari dua reaktor nuklir yang menyebabkan terlalu panasnya bahan bakar radioaktif dan melelehnya sebagian inti reaktor. Materi radioaktif tersebut

lepas ke atmosfer, tetapi tidak ada korban meninggal akibat kecelakaan itu, dan dari sejumlah penelitian epidemiologi yang dilakukan pada penduduk di sekitar TMI tidak menunjukkan dampak kesehatan yang berarti dari pelepasan radioaktif itu [14].

MASALAH YANG SERING DIPERDEBATKAN KELOMPOK ANTI NUKLIR

Reaktor nuklir mampu memberikan energi nuklir lebih dari cukup dengan keuntungan-keuntungan yang nyata bagi lingkungan. Tenaga nuklir menimbulkan lebih sedikit pencemaran (tidak ikut menambah pemanasan global dan hujan asam) dibandingkan dengan pembangkit tenaga yang konvensional. Oleh karena itu instalasi tenaga nuklir layak dipilih dan dapat dibuktikan aman dan cukup ekonomis. Namun hingga kini, menurut kelompok anti nuklir, semua kebaikan itu masih terkait dengan “kalau-kalau” yang besar, seperti Chernobyl, dan dengan ukuran lebih kecil, *Three Mile Island* (TMI), telah meninggalkan sejumlah persoalan yang tidak terpecahkan dalam benak beberapa pakar dan warga masyarakat umum : tingginya biaya dan masalah layak tidaknya nuklir dapat dipercaya (keduanya diperparah oleh kekhawatiran tentang keamanannya) telah membuat reaktor-reaktor nuklir suatu bencana keuangan bagi banyak usaha jasa pekerjaan umum [2]. Hal ini tidak sepenuhnya tepat, karena energi nuklir memerlukan biaya pengoperasian yang relatif rendah dan stabil, sehingga bukan merupakan bencana keuangan [7].

Menurut kelompok penentang energi nuklir, industri nuklir menghadapi soal-soal besar, termasuk akan atau tidak akan memesan dan membangun suatu generasi reaktor baru ; ya atau tidak memperpanjang hidup reaktor-reaktor tua; apa yang akan dilakukan dengan sejumlah besar reaktor yang akan tidak dapat dipakai lagi dalam beberapa dasawarsa mendatang; dan bagaimana mengelola limbah nuklir yang dihasilkan. Instalasi - instalasi baru yang sedang dibangun di

dunia lebih dari 100 reaktor pada tahun 1970-an dan tahun 1980-an tidak dirampungkan, karena tingginya biaya, yakni biaya pembangunan umum, tuntutan-tuntutan keamanan dan proses keterlibatan rakyat sangat menambah besarnya biaya. Kelompok-kelompok aktivis anti-nuklir mendukung protes rakyat, karena pentingnya untuk menjamin keamanannya dan mengumumkan setiap kejadian tentang instalasi reaktornya secara terbuka. Para aktivis itu meluncurkan soal-soal yang oleh pemerintah yang mempunyai energi nuklir sedang mulai dihapus, tetapi akhirnya dipertahankan (misalnya, menentang atau memutar balik fakta terhadap rencana-rencana pengungsian yang dipersiapkan pemerintah dengan cermat). Kelompok-kelompok anti-nuklir memakai proses keterlibatan rakyat untuk memaksakan penundaan pembangunan reaktor dan mengadakan perubahan-perubahan desain, tidak untuk membuat reaktornya lebih aman, tetapi hanya untuk membuatnya lama untuk dibangun. Oleh karena itu NRC (*Nuclear Regulatory Commission* – Komisi Pengatur Nuklir di USA) menjadi ketat dalam soal-soal keamanan untuk meyakinkan kelompok anti nuklir dan rakyat, bahwa reaktor nuklir tersebut aman [13].

Logika dasar tenaga nuklir adalah bahwa jika sudah dibangun, instalasi nuklir itu akan membangkitkan energi yang "terlalu murah", tetapi biaya instalasi telah menjadi terlalu tinggi untuk bersaing melawan arus pasang surplus elektrisitas murah yang dibangkitkan dengan memakai energi fosil, seperti gas alam, minyak bumi dan batubara. Begitu juga terhadap energi terbarukan, seperti hidro, solar dan angin merupakan alternatif energi yang lain. Akan tetapi ketersediaan energi fosil di alam sangat terbatas, juga dampak kesehatan terhadap manusia dan lingkungan perlu juga diperhitungkan. Minyak bumi mudah digunakan sebagai sumber energi berbentuk cair, tetapi berdampak besar terhadap pencemaran lingkungan dan ISPA (infeksi saluran pernapasan atas) bagi manusia. Batubara sebagai cadangan sumber alam yang besar, juga berdampak luas

terhadap pencemaran lingkungan dan ISPA. Gas alam mempunyai dampak lingkungan yang lebih rendah, tetapi mahal dan harus hati-hati pemakaiannya karena mudah terjadi kebakaran. Hidro (air) bersifat lokal, kurang stabil dan sangat bergantung pada curah hujan. Solar dan angin bersih dan tidak akan habis, tetapi sangat bergantung pada kondisi alam. Energi nuklir merupakan jaminan pasokan energi stabil, ramah lingkungan, harga relatif rendah dan stabil [7]. Selain itu, keseluruhan permintaan akan tenaga nuklir telah tertekan turun oleh kelesuan ekonomi (krisis ekonomi) dan langkah-langkah pelestarian. Tentu saja, kecenderungan ini dapat berbalik. Sejumlah pakar mengatakan, jika ekonomi membaik lagi, permintaan tenaga nuklir akan naik, dan harganya pun akan membaik pula. Lagipula, perkembangan perundang-undangan yang terakhir dan yang diusulkan bisa memacu pertumbuhan industri nuklir. Syarat-syarat undang-undang udara bersih (*clean room*) akan menaikkan biaya tenaga listrik yang dibangkitkan batubara dan dapat membuat tenaga nuklir mampu bersaing lagi. Juga, kemungkinan adanya pajak karbon dioksida (CO_2), SO_x dan NO_x beberapa tahun mendatang (suatu langkah yang dipertimbangkan untuk menghambat pemanasan global dan menghambat timbulnya hujan asam) dapat lebih memacu perkembangan tenaga nuklir [13].

Usia instalasi-instalasi tenaga nuklir yang ada sekarang merupakan faktor lain dalam kenaikan biaya. Lambat laun, semua peralatan yang mahal itu harus diganti, dan keamanan peralatan yang tua dipertanyakan, misalnya sudah diperhitungkan bahwa selama beberapa tahun mendatang, diperlukan instalasi untuk mengganti pembangkit-pembangkit tenaga uap yang menunjukkan kecenderungan berkarat dan retak. Juga, kondisi bejana-bejana reaktor – pot-pot baja besar yang memuat bahan bakar – telah mengundang rasa cemas. Radiasi telah membuat pot-pot itu menjadi rapuh yang memberikan resiko besar bagi keselamatan, akibat bertahun-tahun dihujani neutron [14]. Masalah-masalah seperti ini menimbulkan rasa prihatin yang serius

tentang beroperasinya instalasi-instalasi tua. Oleh karena itu Badan Tenaga Nuklir Internasional (IAEA - *International Atomic Energy Agency*) dalam hal ini mengisyaratkan perijinan dan pengawasan yang ketat terhadap beroperasinya reaktor nuklir. Perpanjangan ijin merupakan bagian penting dari rencana keberlanjutan hidup suatu industri. Instalasi umumnya diberi ijin operasi standar 40 tahun [10].

Yankee Rowe di Massachusetts, reaktor tenaga nuklir tertua di USA, menutup usahanya pada tahun 1992. Semula reaktor ini hendak dijadikan uji coba untuk membuktikan bahwa instalasi nuklir mampu beroperasi aman melebihi standar ijin operasi yang usianya 40 tahun. Perusahaan itu memutuskan menutup usahanya, karena instalasi itu terlalu kecil dan terlalu tua untuk dapat berinvestasi, agar tetap dapat beroperasi [14]. Oleh karena itu dengan ditutupnya reaktor nuklir Yankee Rowe yang dimiliki *Northern States Power Company*, akan menjadi contoh pertama untuk perlunya prosedur perizinan dan pengawasan reaktor beroperasi kembali.

MASALAH LIMBAH REAKTOR NUKLIR

Pengelolaan limbah nuklir dari reaktor nuklir merupakan masalah yang sering diperdebatkan kelompok anti nuklir. Limbah radioaktif harus dikucilkan selama 10.000 tahun sebelum semua radioaktifnya terurai ke tingkat-tingkat yang aman. Menurut kelompok tersebut, beberapa limbah akan terus radioaktif sampai ratusan ribu tahun. Kenyataannya, banyak ilmuwan yakin bahwa pemecahan-pemecahan teknis yang layak itu ada. Sengketa untuk mengelola limbah radioaktif ini mempertentangkan ilmuwan yang ingin “memecahkan” masalah itu, melawan ilmuwan yang bertekad membuktikan bahwa masalah itu tidak terpecahkan [10]. Akan tetapi pengelolaan limbah radioaktif yang berbahaya ini sudah dapat diatasi dengan banyak metode yang mutakhir. Kebanyakan departemen energi nuklir di beberapa negara berusaha mengemas limbah atau

zat bekas pakai, yakni butir-butir uranium, logam-logam berat, dan bahan-bahan bekas teknologi tinggi lainnya ke dalam suatu dinding beton atau timbal untuk mencegah pencampuran limbah dengan air, lalu menguburnya dalam lubang-lubang yang dibuat berlapis-lapis dan bebatuan jauh di bawah tanah.

Tempat permanen pertama untuk limbah nuklir dari 5 dasawarsa pembuatan bom atom, berada di gurun New Mexico di USA. Proyek ini dinamakan *Waste Isolation Pilot Project* (WIPP - Proyek Percobaan Pengucilan Limbah). Gurun ini menjadi kuburan terakhir bagi limbah-limbah radioaktif. Di dalam gurun ini dibuat lubang di dalam lapisan-lapisan garam. Uji coba yang sudah dilakukan di gunung Yucca Nevada, meliputi lapisan-lapisan lava yang sudah dingin 12 kali lebih rapat dibandingkan dengan beton [14]. Hal ini menambah keyakinan beberapa rakyat USA akan keamanan energi nuklir, terbukti USA memiliki lebih dari 100 reaktor nuklir sejak tahun 1987 sampai Maret 2006 [7].

Daur bahan bakar Uranium dalam pembangkit tenaga nuklir meliputi fase-fase berikut : (1) penambangan dan pengolahan awal (*milling*), (2) pengolahan lanjutan secara kimia (*refining*), (3) pengayaan (*enrichment*) menaikkan kadar Uranium-235, (4) pembuatan menjadi bahan bakar nuklir, (5) pembakaran bahan bakar nuklir di dalam reaktor, (6) daur ulang bahan bakar yang sudah dipakai, (7) pembuangan/penguburan kontaminan yang lain. Walaupun kebanyakan limbah nuklir dihasilkan di dalam reaktor, masalah pengolahan limbah yang paling rumit terjadi selama pemrosesan ulang bahan bakar, ketika hasil fisi dipisahkan dari unsur bahan bakar yang sudah dipakai. Instalasi pemroses ulang dan tempat penguburan terletak di tempat yang berbeda dari pembangkit (reaktor) tenaga nuklir. Untuk mengurangi bahaya kontaminasi ke lingkungan sampai tingkat serendah mungkin, harus ada daerah khusus yang cukup luas dan harus dipantau secara terus-menerus, terutama fase ke 5, 6, dan 7. Daerah untuk mengubur 50.000 ft³ limbah nuklir tingkat tinggi dan 100.000 ft³ tingkat rendah diperlukan 1

are tanah. Tempat ini harus sering dipantau untuk meyakinkan bahwa air permukaan, air tanah dan udara tidak tercemar [14].

Selama unsur yang terurai (*fissionable*) termasuk uranium, thorium, plutonium, dan lain-lain dapat dipakai sebagai sumber bahan bakar, sejumlah besar limbah hasil penguraian ditambah jumlah sisa dari materi yang dapat terurai, dapat menjadi faktor pembatas dalam mengusahakan penggunaan sumber tenaga nuklir yang secara “tidak terbatas”. Unsur yang berumur panjang (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ¹²⁹I, ⁹⁹Tc, ²³⁸Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am, ²⁴³Am, dan ²⁴⁴Cm) beraktivitas orde Mega Curie harus disimpan. Bahan bakar *fissionable* dapat menambah kebutuhan bahan bakar. Bila suatu saat tenaga fusi dioperasikan, hasil fisi dapat dihindarkan, tetapi radionuklida buatan akan bertambah terutama tritium (³H) yang dapat mencemari hidrologi seluruh dunia. Akan tetapi penelitian terhadap penanganan ³H sudah banyak dikembangkan di seluruh dunia untuk meminimasi dampak hidrologi yang mungkin ditimbulkan.

Perubahan penggunaan bahan bakar fosil menjadi tenaga nuklir akan mengurangi polusi udara, walaupun limbah airnya masih menambah polusi air panas. Untuk menghasilkan 1 kilowatt jam listrik, limbah air panas yang dilepaskan ke atmosfer dan untuk mendinginkan air masing-masing adalah 1.600 dan 5.300 BTU untuk tenaga bahan bakar fosil, sedangkan 500 dan 7.600 BTU untuk tenaga nuklir [1]. Pada era terakhir ini polusi panas dari limbah tenaga nuklir dapat dikurangi dengan menggunakan menara pendingin siklus tertutup dengan berbagai rancangan yang pada prinsipnya mengurangi limbah panas yang dikeluarkan, yaitu dengan menggunakan sistem pendingin evaporasi (penguapan) yang dapat mengurangi konsumsi sumber daya air yang tersedia. Disamping itu, limbah air dari PLTN lebih ringan dampaknya untuk efek ekologi terhadap ikan, plankton dan benthos yang hidup di air [15]. Hal ini berbeda dengan keluaran dari pembangkit tenaga berbahan bakar fosil, embun dari menara pendingin berbahan bakar fosil bereaksi secara

kimiaawi dengan SO_2 dan menghasilkan asam sulfat yang berbahaya bagi organisme yang hidup di air.

SARAN DAN KENYATAAN YANG TERJADI

Kecelakaan nuklir, menurut sejumlah laporan dari komisi-komisi di USA dan negara-negara lain menyimpulkan kebanyakan terjadi karena "kesalahan manusia". Disamping soal-soal ekonomi, skandal-skandal yang berulang kali (misalnya, pemakaian narkoba oleh para penjaga, operator-operator yang tidur pada jam tugas, dan pemalsuan catatan pemeriksaan tingkat keamanan yang dilakukan, dan lain-lain), telah menodai industri nuklir. Butir-butir keselamatan dan pengamanan yang kuat telah dibuat untuk reaktor-reaktor nuklir, jika dijalankan dengan baik. Namun, mengingat dahsyatnya kecelakaan nuklir yang mungkin terjadi, maka toleransi (penyimpangan dari standar yang diizinkan) cukup kecil. "Aman" harus berarti jaminan nyata, bahwa kecelakaan tidak akan terjadi. Masalah tersebut diatasi oleh instalasi-instalasi nuklir dengan memasang sistem peringatan yang lebih baik dan memberi pelatihan amat lengkap kepada operator instalasi. Para operator ruang kendali pada reaktor nuklir komersial kini menjadi pekerja-pekerja teknik terlatih yang handal. Kecelakaan yang dilaporkan oleh semua instalasi pada tahun 1987 di USA, 20 % disebabkan operator yang bersertifikat, 54,4 % oleh pekerja lain dan sisanya disebabkan oleh "non human error" [14]. Akan tetapi lambat laun kesalahan ini berhasil diatasi dengan menerapkan petugas proteksi radiasi yang bertanggung jawab penuh akan dampak radiologi yang mungkin ditimbulkannya.

Industrialisasi disamping mempercepat persediaan segala kebutuhan hidup manusia, juga memberi dampak negatif terhadap manusia akibat terjadinya pencemaran lingkungan. Atas dasar tersebut manusia mulai mempelajari ekosistem dengan siklus geobiokimianya. Dapat dipahami

bahwa pengelolaan lingkungan hidup ini perlu dilakukan secara terpadu dan multidisiplin. Keinginan untuk mengatasi pencemaran udara akibat buangan industri diformulasikan dengan dua formulasi yaitu [16] :

- 1) emisi industri, dengan menggunakan alat pengontrol polusi, atau
- 2) sumber-sumber pencemaran, dengan mendayagunakan kembali zat-zat pencemar

Formulasi pertama tidak akan menangani pencemaran secara tuntas, karena hanya zat-zat pencemar yang sudah ada di cerobong asap yang ditangani, yaitu dengan memasang peralatan anti polusi pada cerobong asap tersebut. Sumber pencemaran akan terus menerus memproduksi zat pencemar. Selain itu zat-zat pencemar yang tertangkap kembali, tetap harus dibuang. Formulasi kedua memperlihatkan maksud untuk menangani pencemaran mulai dari sumbernya, sehingga apabila berhasil, maka zat pencemar tidak akan ada ataupun berkurang jumlahnya. Juga dipikirkan bagaimana memanfaatkan kembali zat pencemar yang tertangkap kembali sejauh mungkin. Pencemaran udara akibat penggunaan tenaga nuklir menganut formulasi kedua yakni dengan menggunakan sistem daur ulang bahan bakar yang sudah dipakai. Oleh karena itu energi nuklir aman dari pencemaran udara.

Catatan-catatan resmi dari NRC di USA menunjukkan bahwa instalasi nuklir komersial mengalami lebih sedikit pemadaman tidak terencana, dan juga lebih sedikit terjadinya kecelakaan (insiden). NRC mempunyai wewenang memerintahkan aneka perubahan desain instalasi dan prosedur pengoperasian tenaga nuklir. Ada perbedaan besar antara reaktor-reaktor terbaik dan terburuk dalam ukuran kehilangan waktu, pelanggaran, masalah keamanan, dan seterusnya. Jumlah pemadaman tidak terencana turun dari rata-rata 7,4 kali per instalasi pada tahun 1980 menjadi 1,6 kali per instalasi pada tahun 1990. Hal ini disebabkan

lebih baiknya operasi instalasi nuklir dan upaya-upaya keamanannya yang tidak terlalu kaku.

Pemerintah yang berencana membangun tenaga nuklir perlu memulai program nuklir agresif yang bertujuan merancang suatu jenis reaktor standar yang hampir bebas dari melelehnya inti reaktor. Desain industri nuklir yang baru perlu dipertimbangkan ciri-ciri keamanan yang "pasif", tidak melibatkan sistem mekanis atau tindakan manusia yang rawan kegagalan. Sistem desain baru tersebut perlu dibuat air pendingin darurat pada reaktor tanpa pemakaian pompa. Air itu dipaksa masuk oleh tekanan gas yang tersimpan dalam tangki-tangki, sehingga diperlukan sensor-sensor untuk mengirim sinyal ke katup-katup mekanis. Hal ini menghindari polusi panas yang dibuang ke air lingkungan.

Kecelakaan nuklir terhitung sebagai kecelakaan berdampak besar, namun berpeluang kecil untuk terjadinya kecelakaan. Kebanyakan fokus terkait pada peraturan dan politik yang terarah pada memperdebatkan peluang tersebut. Namun perhatian lebih besar perlu diberikan pada dampak besar yang ditimbulkan dari kecelakaan nuklir tersebut. Penyediaan potassium iodida (KI) perlu diadakan, meskipun bukan untuk penawar racun, jika KI diminum, dapat mencegah tertanamnya (mengendapnya) yodium radioaktif dalam kelenjar gondok. Hal ini suatu jalan untuk menghadapi dampak besar yang ditimbulkan yodium radioaktif di kelenjar gondok. Begitu pula rencana pengungsian (evakuasi) akibat kecelakaan, perlu direncanakan, dan punya makna penting dalam banyak sengketa pendapat-pendapat tentang nuklir. Asuransi kesehatan merupakan masalah yang mengacu pada dampak besar itu. Batas tingkat kerawanan instalasi nuklir terhadap kecelakaan perlu dituangkan dalam Undang-Undang. Tanpa Undang-Undang itu, mungkin instalasi nuklir tidak dapat diasuransikan, dan berakibat instalasi itu tidak dapat dibangun. Ini berarti bahwa dampak besar kecelakaan nuklir yang mungkin terjadi mempunyai batas ambang dari segi pandang

finansial perusahaan, tetapi tidak dari segi pandang kesehatan masyarakat.

Dampak kecelakaan Chernobyl berakibat kurang percayanya masyarakat pada sebagian dari semua reaktor nuklir yang beroperasi di Rusia dan Eropa Timur, dianggap tidak aman oleh banyak orang. Hal ini diperparah keadaan dengan bertambahnya usia reaktor, ditambah dengan politik yang membuat banyak pakar tenaga nuklir hijrah ke negara-negara lain dan dipotongnya anggaran bagi mereka yang tinggal di negaranya sendiri. Orang mulai menyadari bahwa biaya riil pembongkaran reaktor nuklir yang telah tua dan yang tidak lagi menguntungkan, ternyata sama mahalannya dengan biaya pembangunannya [11]. Para ahli nuklir Amerika Serikat bersama NRC berulang kali mendesak, agar diambil langkah-langkah untuk menutup reaktor-reaktor yang paling buruk di Rusia dan Eropa Timur, dan agar minta bantuan bagi sebagian yang lain. Jika terjadi bencana macam Chernobyl lagi, hal itu bisa menambah suramnya harapan bagi generasi masa depan instalasi-instalasi nuklir USA.

Pelajaran lain yang dapat dipetik dari kejadian di TMI adalah pertama, pentingnya membedakan antara mengelola secara buruk, baik dari segi teknis maupun manajemen, dan kedua, menutup-nutupi keburukan yang terjadi. Yang pertama, mengacu pada kesalahan-kesalahan yang dibuat dalam memahami apa tepatnya yang sedang terjadi dan kegagalan menguasai teknologinya. Yang kedua mengacu pada keprihatinan, bahwa masyarakat tidak diberi tahu apa yang sebenarnya yang sedang terjadi. Pada kejadian di TMI, masyarakat mencurigai NRC berbohong, karena kurang pahaman mereka mencoba memahami apa sebenarnya yang sedang terjadi.

Prosedur-prosedur tradisional yang sering dipakai dalam mengendalikan suatu bahaya nuklir, bila bahaya sudah dikenali adalah [14] :

- a. **Penggantian atau daur ulang (*recycle*) radionuklida**

Mengganti radionuklida yang mempunyai waktu paruh yang panjang dengan radionuklida yang waktu paruhnya pendek, sehingga dampak kesehatan yang ditimbulkan pada radionuklida dengan waktu paruh orde detik cepat hilang, dibandingkan radionuklida waktu paruh orde hari, bulan atau tahun. Contohnya radionuklida yang digunakan untuk thyroid adalah ^{131}I yang berumur waktu paruh 7 hari diganti dengan radionuklida $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang berumur 6 jam. Radionuklida yang sudah digunakan sebagian dapat di daur ulang, sehingga dapat digunakan lagi, sedangkan radionuklida yang tidak dapat didaur ulang akan dilimbahkan. Proses ini sangat menguntungkan bagi instalasi tenaga nuklir, disamping menghemat biaya pembelian radionuklida, juga mengurangi dampak kesehatan yang diakibatkannya.

b. Pengendalian rekayasa

Perlu digunakan perisai dari beton atau Pb (baja hitam) yang dapat menahan radiasi gamma (γ), beta (β) dan alpha (α) untuk mengisolasi suatu proses pengolahan bahan radioaktif sedemikian hingga meskipun tetap berbahaya, tidak seorangpun tercemar (terkontaminasi), atau kontaminasinya sekecil mungkin. Tidak ada pencemaran, berarti tidak ada resiko. Dalam banyak hal, ini sulit dicapai tanpa menghentikan sama sekali penggunaan bahan radioaktif. Instalasi nuklir dapat menggunakan sistem filtrasi yang efisiensi penyaringan udaranya 99,99 % yakni HEPA (*High Efficiency Particulate Air*), sehingga udara yang dibuang ke lingkungan lewat cerobong bisa diminimisasi radioaktivitasnya.

c. Perlindungan perorangan

Aneka ragam perlindungan pekerja pengoperasian tenaga nuklir dapat berupa pakaian jas laboratorium, kaca mata anti radiasi, masker, sarung tangan, sepatu khusus, alat pemantau radiasi (surveimeter, dosimeter, dll.) dan lain-lain. Masker yang digunakan

termasuk masker debu, masker tabung (masker dengan penyaring dan bahan kimia penawar racun), dan masker napas dengan persediaan udara yang memakai selang-selang udara. Tiga solusi penggunaan bahan radioaktif agar aman yakni perisai, waktu dan jarak. Setiap bekerja dengan bahan radioaktif harus ada perisainya, waktu penggunaannya secepat mungkin, dan jaraknya sejauh mungkin dengan sumber radioaktif.

d. Pengendalian administratif

Ini mencakup pendidikan pekerja, pemberian label pada semua bahan yang digunakan, saling gilir tempat kerja, mengurangi kerja lembur, tidak boleh kerja seorang diri, dan cara-cara lain yang tidak terkait langsung dengan kejadian pencemaran. Pemeriksaan kesehatan secara berkala kepada para pekerja, diharuskan terutama pemeriksaan terhadap seseorang yang dicurigai terkena bahan radioaktif. Pemeriksaan kesehatan ini merupakan program tambahan yang membantu dalam mengenali dan mengendalikan resiko pencemaran.

PENUTUP

Kapasitas terpasang untuk pembangkit listrik tenaga nuklir di seluruh dunia akan bertambah, seiring dengan majunya teknologi nuklir dan jaminan keamanan dari IAEA. Tenaga nuklir menimbulkan lebih sedikit pencemaran (tidak ikut menambah pemanasan global dan hujan asam) dan memberikan energi nuklir lebih dari cukup dengan keuntungan-keuntungan yang nyata bagi lingkungan, dibandingkan dengan pembangkit tenaga konvensional. Pemerintah Indonesia yang merencanakan pembangunan PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) pada tahun 2010 harus mengkaji dan mengelola secara detil, agar aman, selamat dan mampu kompetitif dengan energi konvensional. Kebanyakan kecelakaan nuklir terjadi, karena kesalahan manusia, disamping soal-soal ekonomi, dan

skandal-skandal yang berulang kali telah menodai industri nuklir. Prosedur-prosedur yang sering dipakai dalam mengendalikan suatu bahaya nuklir adalah penggantian atau daur ulang (*recycle*) radionuklida, pengendalian rekayasa, perlindungan perorangan, dan pengendalian administratif.

DAFTAR PUSTAKA

1. ODUM, E. P., Fundamental of Ecology, third edition, Saunders College Publishing, Rinehart and Winston Inc., Philadelphia, 1971.
2. GREENPEACE INTERNATIONAL, WISE - Paris and Worldwatch Institute, op.cit.; The World Nuclear Industry Status Report ; A Grid for East Asia; Energy Economist, London, 1992.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Reactors in the world, Vienna, Reference Series Data, IAEA-RDS-2/12, SERIES NO. 2, 1992.
4. URANIUM INFORMATION CENTRE, Nuclear Power in the World Today, Nuclear Issues Briefing Paper 7, IAEA source data, Melbourne, Australia, <http://www.uic.com.au/nip07.htm>, dan <http://www.uic.com.au/reactors.htm>, Maret 2006.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Bulletin, Vol. 30 No. 3, Vienna, Austria, 1988.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Bulletin, Vol. 32 No. 1, Vienna, Austria, 1990.
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Bulletin, Vol. 44 No. 2, Vienna, Austria, 2002.
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Research Reactor in the World, Vienna, Austria, <http://www.iaea.org/worldatom/rrdb/>, Maret 2006.
9. LA FRANCHI, H., EdF Orders Reactors Covers, French Lead Europe in Reactors and Power Generation, European Energy Reports, 1993.
10. DEPARTMENT OF ENERGY, Commercial Nuclear Power, Government Printing Office, Energy Information Administration, Washington, D.C., U.S, 1990.
11. McGEE, S., Ontario Hydro Will Reduce its Budget for Capital Spending to Cut Power Costs, Wall Street Journal, 1992.
12. SANGER, D. E., Japan may cut Atomic Shipments, New York Times, 1992.
13. SOEMARWOTO, O., Tanda-tanda Jaman Era 90 - an, Yayasan Obor Indonesia, Jakarta, 1995.
14. WEST, B., , SANDMAN, P.M., and GREENBERG, M.R., The Reporter's Environmental Handbook, Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 1995.
15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Environmental Effects of Cooling Systems, IAEA, Technical Reports Series No. 202, 1980.
16. SLAMET, J. S., Kesehatan Lingkungan, cetakan keempat, Gadjah Mada University Press, Bulaksumur, Yogyakarta 55281, pp 21-38, 2000.